

不同有机肥对砂田西瓜产量、品质和养分吸收的影响

杜少平¹ 马忠明^{2*} 薛亮³

(¹甘肃省农业科学院蔬菜研究所, 兰州 730070; ²甘肃省农业科学院, 兰州 730070; ³甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 兰州 730070)

摘 要 探讨不同有机肥对西北砂田西瓜生长、产量、品质和养分吸收利用的影响, 为砂田西瓜合理施肥、优质高效生产提供理论依据。本试验以单施化肥为对照, 在氮、磷、钾等养分条件下, 设置了牛粪、鸡粪、羊粪、猪粪 4 个处理, 测定了西瓜不同生育时期生长指标、产量、品质及养分吸收积累量。结果表明: 施用牛粪、鸡粪和猪粪有机肥较单施化肥可促进西瓜营养生长和氮、钾养分的运转, 显著提高西瓜产量和养分的吸收积累量, 其中西瓜产量较化肥处理分别显著提高了 27.4%、31.6% 和 30.2%, 氮素积累量分别提高了 26.3%、39.8% 和 47.4%, 磷素积累量分别提高了 49.3%、48.3% 和 55.9%, 钾素积累量分别提高了 35.8%、41.6% 和 51.9%。猪粪处理的西瓜品质最优, 中心、边缘可溶性固形物含量较化肥处理分别显著提高了 5.5% 和 11.6%, Vc 含量提高了 19.9%。羊粪处理各指标与化肥处理间差异不显著, 甚至略低于化肥处理。综上, 砂田西瓜种植应优先选用猪粪和鸡粪有机肥, 避免或减少施用羊粪有机肥。

关键词 有机肥; 砂田; 西瓜; 产量; 品质; 养分吸收

Effects of different kinds of organic fertilizer on fruit yield, quality and nutrient uptake of watermelon in gravel-mulched field. DU Shao-ping¹, MA Zhong-ming^{2*}, XUE Liang³ (¹*Institute of Vegetables, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China*; ²*Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China*; ³*Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China*).

Abstract: The effects of different kinds of organic fertilizer on the growth, yield, quality, and nutrient absorption and utilization of watermelon were examined to provide theoretical basis for adequate fertilization and efficient production of watermelon in gravel-mulched field in the Loess Plateau of Northwest China. The growth index and nutrient absorption at main stages of growth and development, yield and quality of watermelon were compared among treatments of applying chemical fertilizer (CK), cattle dung, chicken manure, sheep manure and pig manure which contained the equal amount of nitrogen, phosphorus and potassium. The results showed that vegetative growth index, nitrogen and potassium transportation were promoted, yield and nutrient accumulation were improved in treatments of cattle dung, chicken manure and pig manure. Compared to chemical fertilizer, the fruit yield increased by 27.4%, 31.6% and 30.2%, respectively, nitrogen accumulation improved by 26.3%, 39.8% and 47.4%, phosphorus accumulation increased by 49.3%, 48.3% and 55.9%, potassium accumulation improved by 35.8%, 41.6% and 51.9%, respectively, under cattle dung, chicken manure and pig manure treatments. The quality of watermelon was better in pig manure treatment among all the treatments. The central and edge sugar content of watermelon increased by 5.5% and 11.6%, respectively, and Vc content increased by 19.9%, compared with

本文由国家重点研发计划项目 (2018YFD0201300)、甘肃省农业科学院中青年基金项目 (2018GAAS05) 和国家西甜瓜产业技术体系项目 (CARS-26-20) 资助 This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFD0201300), the Foundation for Young in Gansu Academy of Agricultural Sciences (2018GAAS05), and the China Agriculture Research System for Watermelon and Melon (CARS-26-20).

2018-11-01 Received, 2019-02-02 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mazhming@163.com

the chemical fertilizer treatment. There was no significant difference between sheep manure and chemical fertilizer treatments. In conclusion, chicken manure and pig manure were optimal organic fertilizers for watermelon planting in gravel-mulched field. The application of sheep manure should be avoided or reduced.

Key words: organic fertilizer; gravel-mulched field; watermelon; yield; quality; nutrient uptake.

化肥的出现在现代农业发展中担当着相当重要的角色,2016 年我国化肥消费量达到 5984.60×10^4 t, 约占世界总消费量的 31.7%, 其中 N 2959.08×10^4 t、 P_2O_5 1906.36×10^4 t、 K_2O 1119.17×10^4 t, 分别占世界的 27.9%、39.8% 和 32.0%^[1]. 化肥的大量施用,一方面在保证粮食安全方面起到了极为重要的作用,同时也造成资源和环境的矛盾日益突出,农业可持续发展也面临巨大挑战.长期过量或不合理施肥会导致土壤板结、酸化,肥力下降,营养元素失衡,硝酸盐污染和次生盐渍化.我国是世界畜禽养殖大国,据估算,每年畜禽粪便产生量约为 17.3×10^8 t, 其中牛粪 10.7×10^8 t、猪粪 2.7×10^8 t、羊粪 3.4×10^8 t、家禽粪 1.8×10^8 t, 畜禽粪便中含有的氮、磷分别是 1.60×10^7 和 3.63×10^6 t, 相当于中国同期使用化肥量的 78.9% 和 57.4%^[2], 因此肥料化是有机废弃物资源化利用的重点发展方向之一.已有研究表明,与单施化肥相比,长期施用有机肥可改良土壤物理结构^[3-4]、提高土壤肥力^[5-6]、改善土壤微生物性状^[7-8],进而提高水肥利用效率^[9],增加作物产量,改善作物品质^[10].

砂田是分布于我国西北干旱半干旱地区的一种传统免耕、覆盖抗旱耕作方式,可协调和改善土壤水、热、气、肥等状况,达到土壤和作物之间的生理协调,为作物生长创造较好的环境条件,增加作物产量,创造了世界农耕史上的奇迹^[11].“压砂瓜”是砂田最具代表的一张名片,2008 年仅宁夏中卫市压砂西瓜面积就达到了 6.67 万 hm^2 , 甘肃省压砂西瓜面积稳定在 1.33 万 hm^2 左右^[12], 已成为西北干旱半干旱地区带动农民脱贫致富、增收减灾的新兴绿色产业.近年来,砂田西瓜在发挥其巨大的经济效益和生态效应的同时,由于长期连作和施用化肥,也面临着砂田老化、土壤盐渍化、连作障碍、水肥利用效率低下等一系列制约压砂瓜产业持续健康发展的瓶颈问题^[12-14].以往研究表明,施用有机肥不仅可以增加土壤肥力,而且还可以提升作物的耐盐能力^[15],通过改变土壤微生物群落结构从而抑制西瓜连作障碍^[16-17].由于有机肥种类繁多,来源广泛,不同有机肥养分特性存在明显差异,另外,有机肥矿化受温

度、水分、微生物种类、自身理化性质等多种因素影响,因此,不同有机肥在不同区域及西瓜栽培模式下的应用效果也存在差异^[18-20].为此,本试验以旱砂田西瓜为研究对象,通过分析不同有机肥源对西瓜生理生长、产量、品质及养分吸收利用的影响,探讨适宜于旱砂田西瓜生长发育的有机肥源,为旱砂田西瓜的合理施肥提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 试验区概况

本试验于 2017 年在甘肃省农业科学院皋兰实验站进行,位于皋兰县九合镇三坪村 ($36^{\circ}13' N$, $103^{\circ}42' E$), 平均海拔 1830 m 左右,属温带半干旱气候区,降水少且变率大,季节分配不均,多年平均降水量 260 mm,多集中在 7—9 月,占全年降水的 60% 以上,年平均气温 $7.0^{\circ}C$, $\geq 10^{\circ}C$ 的活动积温为 $2798^{\circ}C$, 无霜期 142 d. 试验地为 20 年砂田,土壤质地为砂土,播前 0~20 cm 土壤基础养分含量为:有机质 $4.23 g \cdot kg^{-1}$ 、全氮 $0.35 g \cdot kg^{-1}$ 、碱解氮 $40.38 mg \cdot kg^{-1}$ 、速效磷 $22.20 mg \cdot kg^{-1}$ 、速效钾 $97.17 mg \cdot kg^{-1}$, pH 8.48, 西瓜全生育期降雨量为 170.55 mm.

1.2 试验材料与试验设计

供试西瓜品种为‘西沙瑞宝’,化肥氮肥为尿素 (N 46%)、磷肥为普过磷酸钙 (P_2O_5 12%)、钾肥为硫酸钾 (K_2O 50%). 有机肥为皋兰县腾达养殖专业合作社提供的羊粪、牛粪、猪粪和鸡粪,经发酵腐熟后使用,其养分含量见表 1.

表 1 不同有机肥主要养分含量
Table 1 Main nutrient contents of different organic fertilizers (%)

处理 Treatment	水分含量 Water content	有机质 Organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K
羊粪 Sheep manure	26.3	19.7	0.7	0.4	2.6
牛粪 Cattle manure	36.7	31.1	1.5	1.4	2.1
猪粪 Pig manure	15.6	18.7	1.5	3.3	1.5
鸡粪 Chicken manure	16.7	21.1	2.5	2.4	2.3

试验设 5 个处理： T_1 ：牛粪、 T_2 ：鸡粪、 T_3 ：羊粪、 T_4 ：猪粪、CK：化肥。每处理 3 次重复，小区面积 31.5 m^2 。各处理的全氮、全磷、全钾养分为砂田西瓜优化推荐施用量^[21]，均为 $\text{N } 200\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5\text{ } 170\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 215\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，有机肥、化肥分别提供总养分的 50%，即羊粪 $10960.54\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、牛粪 $9210.71\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、猪粪 $5472.35\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、鸡粪 $4909.29\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，利用无机氮、磷、钾肥调节各处理使养分用量相同。有机肥处理所有肥料均做基肥于西瓜播种前在瓜行条施，化肥处理 30%氮肥、100%磷肥和 50%钾肥做基肥，70%氮肥和 50%钾肥做追肥于西瓜膨果初期距茎基部 20 cm 处穴施。2017 年 4 月 15 日播种，7 月 23 日收获，采用宽窄行“品”字形栽培模式，窄行 0.6 m，宽行 0.9 m，株距 55 cm，种植密度 $13200\text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其他田间管理措施同当地。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 西瓜生理生长指标 分别在西瓜苗期（三叶一心）、伸蔓期和坐果期每小区随机选 5 株具有代表性、长势一致的植株，使用 SPAD-502 叶绿素计进行叶绿素含量测定。分别在西瓜苗期（三叶一心）、伸蔓期、坐果期和成熟期，每小区随机选取 5 株具有代表性、长势一致的植株，用钢卷尺测量主蔓长，105 ℃杀青 0.5 h，然后在 80 ℃烘至恒量后测定植株干物质质量。

1.3.2 产量与品质 西瓜成熟期，每小区随机选 10 个具有代表性、长势一致的西瓜测定单瓜质量，并统计每小区西瓜成果数，然后统计产量。采用手持式折光仪测定西瓜果实中心和边缘的可溶性固形物含量，比色法测定维生素 C 含量^[22]，紫外分光光度法测定硝酸盐含量^[22]。

1.3.3 土壤和植株养分 在西瓜播种前采用“S”形 5 点取样法测定 0~20 cm 土层基础养分；分别在西瓜苗期、伸蔓期、坐果期和收获后，结合生育期植株干物质和考种测定植株及果实全氮、磷、钾含量。土壤、植株养分测定采用土壤农业化学常规分析方法^[23]，植株和果实全氮采用凯氏定氮法、全磷采用钒钼黄比色法、全钾采用火焰光度计法测定。

1.4 数据处理

植株养分积累转运与利用的相关计算公式^[24]：
各器官养分积累量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 养分含量 × 干物质质量；
营养器官氮素转运量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) = 坐果期营养器官氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量；
营养器官氮素转运率 = 营养器官氮素转运量 / 坐果期营养器官氮素积累量 × 100%；
氮素收获指数 = 果实

氮素积累量 / 植株氮素积累量。采用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析。采用单因素 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法进行方差分析和多重比较 ($\alpha=0.05$)，表中数据为平均值 ± 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对西瓜生理生长的影响

2.1.1 叶绿素含量 从西瓜不同生育时期的叶绿素含量来看，不同施肥处理对西瓜叶片叶绿素含量影响显著，总体呈先升高后降低的变化趋势。除西瓜坐果期养分从营养器官向果实运移导致叶片叶绿素含量差异不显著外，其他时期鸡粪和猪粪处理的叶绿素含量均显著高于化肥处理，其中苗期鸡粪和猪粪处理的西瓜叶绿素含量较化肥处理分别提高了 12.7% 和 10.0%，伸蔓期分别提高了 7.5% 和 5.5%（表 2）。

2.1.2 主蔓长 从表 3 可以看出，除苗期外，不同施肥处理对西瓜主蔓长影响显著，伸蔓期猪粪处理的西瓜主蔓长较化肥处理显著增加了 40.0%，坐果期牛粪、鸡粪、羊粪和猪粪处理较化肥处理分别增加了 62.8%、72.3%、29.7% 和 72.3%，至成熟期除羊粪处理外，牛粪、鸡粪和猪粪处理较化肥处理分别增加了 23.2%、29.8% 和 23.0%。由此可见，在旱砂田栽培模式下，有机肥尤其是牛粪、鸡粪和猪粪与化肥相比能够促进西瓜植株的营养生长。

2.1.3 植株干物质 除羊粪处理外，西瓜不同生育时期各有机肥处理的植株干物质均显著高于化肥处理，其中牛粪、鸡粪和猪粪处理的植株干物质较化肥处理在西瓜苗期分别提高了 62.6%、53.1% 和 59.2%，伸蔓期分别提高了 70.2%、57.5% 和 105.3%，坐果期分别提高了 121.3%、120.5% 和 106.8%，成熟期分别提高了 39.8%、66.5% 和 48.4%。综上，不同有机肥较化肥处理西瓜植株干物质的增加幅度在苗期

表 2 不同施肥处理的西瓜叶片叶绿素含量
Table 2 Leaf chlorophyll content of watermelon under different fertilizer treatments (SPAD)

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	伸蔓期 Vine stage	坐果期 Fruit stage
化肥 Chemical fertilizer	49.69±1.65b	60.77±2.61c	59.47±2.27a
牛粪 Cattle manure	52.86±2.96ab	62.52±0.89bc	60.84±1.86a
鸡粪 Chicken manure	55.99±1.91a	65.32±1.79a	61.32±2.24a
羊粪 Sheep manure	50.03±2.37b	61.31±0.67c	60.41±0.48a
猪粪 Pig manure	54.67±1.61a	64.10±0.56ab	62.11±1.38a

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column indicated significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

表 3 不同施肥处理西瓜主要生育时期的主蔓长
Table 3 Vine length of watermelon in main growth stages under different fertilizer treatments (cm)

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	伸蔓期 Vine stage	坐果期 Fruit stage	成熟期 Mature stage
化肥 Chemical fertilizer	6.90±0.41a	90.67±2.52bc	92.33±3.79c	156.50±9.99c
牛粪 Cattle manure	6.20±0.13a	108.17±8.69ab	150.33±6.35a	192.83±6.25ab
鸡粪 Chicken manure	6.77±0.43a	106.67±6.66ab	159.00±24.27a	203.17±28.92a
羊粪 Sheep manure	6.75±0.75a	71.33±16.17c	119.67±14.47b	162.67±11.02bc
猪粪 Pig manure	7.98±0.73a	127.00±15.98a	159.00±12.12a	192.50±17.50ab

表 4 不同施肥处理的西瓜主要生育时期植株干物质积累量
Table 4 Dry matter accumulation amount of watermelon plant in main growth stages under different fertilizer treatments (g · plant⁻¹)

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	伸蔓期 Vine stage	坐果期 Fruit stage	成熟期 Mature stage
化肥 Chemical fertilizer	1.79±0.29b	33.27±6.92c	43.38±9.23c	88.08±9.73c
牛粪 Cattle manure	2.91±0.07a	56.62±3.66b	96.01±7.55a	123.14±14.83ab
鸡粪 Chicken manure	2.74±0.21a	52.41±5.64b	95.63±9.47a	146.68±20.84a
羊粪 Sheep manure	1.57±0.20b	23.70±4.47c	67.02±7.58b	96.73±6.06bc
猪粪 Pig manure	2.85±0.21a	68.31±8.52a	89.71±6.12a	130.74±18.59a

至坐果期随着生长发育而逐渐增大,在坐果期至成熟期随着生长中心的转移而减小,表明有机肥较化肥具有较强的供肥持续性(表 4)。

2.2 不同施肥处理对西瓜产量和品质的影响

由表 5 可知,牛粪、鸡粪和猪粪处理的西瓜产量较化肥处理分别显著提高了 27.4%、31.6% 和 30.2%,而羊粪处理的西瓜产量与化肥处理间差异不显著,甚至还略低于化肥处理.猪粪处理的西瓜中心、边缘可溶性固形物含量较化肥处理分别显著提高了 5.5%和 11.6%,且在所有处理中西瓜的糖分梯度最小,为 1.32;牛粪和鸡粪处理较化肥处理对西瓜可溶性固形物含量也有提高作用,但差异不显著;羊粪处理的西瓜可溶性固形物含量最低,且糖分梯度最大,为 1.92,表明施用羊粪不利于西瓜的糖分转化与积累.Vc 含量是衡量蔬果品质的一个重要指标,鸡粪和猪粪处理的西瓜 Vc 含量较化肥处理分别显著提高了 10.8%和 19.9%.除羊粪外,有机肥较化肥处理在提高西瓜其他品质指标的同时,也不同程度

地提高了西瓜硝酸盐含量,但均符合我国制定的硝酸盐含量小于 600 mg · kg⁻¹ 的无公害水果要求^[25]。

2.3 不同施肥处理对西瓜养分吸收、积累的影响

2.3.1 氮素吸收积累 由表 6 可知,西瓜植株的氮素含量随着生育时期的推移而递减,苗期和伸蔓期不同处理的植株氮素含量总体表现为猪粪>鸡粪>牛粪>化肥>羊粪,其中猪粪、鸡粪和牛粪处理较羊粪在苗期植株氮素含量分别显著提高了 17.1%、10.8%和 9.9%,伸蔓期分别显著提高了 13.3%、13.1%和 11.5%.在西瓜坐果期由于植株氮素发生转移,除羊粪处理外,牛粪、鸡粪和猪粪处理的植株氮素含量较化肥处理分别显著降低了 15.0%、7.8%和 5.7%.至西瓜成熟期,所有有机肥处理的植株氮素含量均显著低于化肥处理,牛粪、鸡粪、羊粪、猪粪处理较化肥处理分别降低了 11.8%、17.9%、11.2%和 15.1%。

西瓜不同生育时期植株氮素积累量受植株干物质量和氮素含量的共同影响,除化肥处理外,总体表

表 5 不同施肥处理的西瓜产量与品质
Table 5 Fruit yield and quality of watermelon under different fertilizer treatments

处理 Treatment	产量 Yield (kg · hm ⁻²)	可溶性固形物 Soluble solid (%)		维生素 C Vitamin C (mg · kg ⁻¹)	硝酸盐 Nitrate (mg · kg ⁻¹)
		中心 Center	边缘 Edge		
化肥 Chemical fertilizer	36164±1769b	10.9±0.3bc	9.2±0.4bc	47.32±0.13cd	54.32±5.56bc
牛粪 Cattle manure	46064±1298a	11.3±0.2ab	9.5±0.3abc	49.26±0.06c	56.37±4.29bc
鸡粪 Chicken manure	47587±6454a	11.3±0.1ab	9.6±0.2ab	52.44±0.16b	62.63±8.52b
羊粪 Sheep manure	32541±5809b	10.8±0.1c	8.8±0.6c	46.55±0.11d	49.31±3.27c
猪粪 Pig manure	47066±4061a	11.5±0.2a	10.2±0.4a	56.75±0.09a	74.74±2.01a

表 6 不同施肥处理的西瓜主要生育期植株养分含量
Table 6 Nutrient contents of watermelon in main growth stages under different fertilizer treatments (g · kg⁻¹)

养分 Nutrient	处理 Treatment	苗期 Seedling stage	伸蔓期 Vine stage	坐果期 Fruit stage	成熟期 Mature stage
N	化肥 Chemical fertilizer	47.78±1.44b	44.17±0.51ab	42.92±1.54a	24.75±2.54a
	牛粪 Cattle manure	48.93±2.09b	46.29±0.88a	36.48±1.70d	21.82±0.73b
	鸡粪 Chicken manure	49.32±1.85ab	46.96±1.73a	39.56±1.56c	20.33±0.63b
	羊粪 Sheep manure	44.51±1.83c	41.53±2.36b	42.30±0.60ab	21.97±0.22b
	猪粪 Pig manure	52.10±1.09a	47.06±2.22a	40.47±0.82bc	21.01±1.23b
P	化肥 Chemical fertilizer	3.80±0.25b	3.85±0.08b	3.01±0.10c	2.00±0.31a
	牛粪 Cattle manure	4.80±0.16a	4.44±0.14a	3.18±0.08bc	2.09±0.26a
	鸡粪 Chicken manure	4.62±0.27a	4.27±0.10a	3.25±0.08b	2.18±0.08a
	羊粪 Sheep manure	3.63±0.14b	3.72±0.19b	3.05±0.04c	2.15±0.18a
	猪粪 Pig manure	4.93±0.05a	4.47±0.37a	3.51±0.16a	2.29±0.29a
K	化肥 Chemical fertilizer	19.22±1.00ab	14.07±0.76b	10.91±1.04b	5.98±1.00b
	牛粪 Cattle manure	24.04±2.88a	16.40±1.04a	12.41±1.60ab	7.98±1.00a
	鸡粪 Chicken manure	21.88±3.78ab	17.06±0.58a	13.90±1.04a	6.32±0.58b
	羊粪 Sheep manure	18.56±3.05b	14.57±1.04b	13.24±1.00ab	4.99±1.00b
	猪粪 Pig manure	23.21±2.17a	16.06±0.29a	13.74±1.73a	5.65±0.58b

现出先增加后降低的变化趋势,其中苗期至伸蔓期植株氮素积累最快,坐果后由于发生转移而降低(表 7)。除羊粪处理外,其他有机肥处理的西瓜各生育时期植株氮素积累量均显著高于化肥处理,牛粪、鸡粪和猪粪处理在西瓜苗期较化肥处理分别提高了 58.7%、52.2%和 69.6%,伸蔓期分别提高了 78.5%、68.1%和 119.1%,坐果期分别提高了 87.1%、102.4%和 94.1%,成熟期分别提高了 23.3%、37.0%和 25.7%。从西瓜果实及收获期植株总氮素积累量来看,只有鸡粪和猪粪处理显著高于化肥处理,其中果实氮素积累量较化肥处理分别提高了 41.1%和 57.2%,总氮素积累量分别提高了 39.8%和 47.4%。综上,鸡粪和猪粪对西瓜营养生长期和生殖生长期的氮素积累均具有促进作用。不同有机肥处理在西瓜果实发育期均有 20% 以上的氮素养分来自营养器官的转移,而化肥处理为负值,表明有机肥处理更

有利于氮素的循环与利用。猪粪处理的西瓜氮素收获指数最高,较化肥处理显著提高了 24.3%。

2.3.2 磷素吸收积累 不同施肥处理的西瓜植株磷素含量也随生育时期的推移整体呈下降趋势,其中苗期至伸蔓期保持相对稳定,伸蔓期后下降较为迅速。在西瓜营养生长期,除羊粪外,其他有机肥处理的西瓜植株磷素含量也显著高于化肥处理,牛粪、鸡粪和猪粪处理在西瓜苗期较化肥处理分别提高了 26.3%、21.6%和 29.7%,在伸蔓期分别提高了 15.3%、10.9%和 16.1%,在坐果期分别提高了 5.7%、8.0%和 16.6%,至成熟期,所有施肥处理的植株磷素含量差异不显著。综上,有机肥较化肥处理能够促进植株对磷素的吸收,且随着西瓜植株的生长发育,增加量逐渐降低,其中以猪粪处理的西瓜植株磷素含量最高(表 6)。

由表 8 可知,从不同施肥处理西瓜各生育时期

表 7 不同施肥处理对西瓜氮素积累与运转的影响
Table 7 Effects of different fertilizer treatments on nitrogen accumulation and translocation of watermelon

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	伸蔓期 Vine stage	坐果期 Fruit stage	成熟期 Mature stage (kg · hm ⁻²)			氮运转量 NTA (kg · hm ⁻²)	氮运转率 NTR (%)	氮收获 指数 NHI
	(kg · hm ⁻²)	(kg · hm ⁻²)	(kg · hm ⁻²)	植株 Plant	果实 Fruit	全株 Total			
化肥 Chemical fertilizer	0.92±0.12b	15.41±3.10c	19.64±4.81c	22.84±2.67b	50.23±4.29b	73.07±5.92bc	-3.20±3.00b	-	2.22±0.25b
牛粪 Cattle manure	1.46±0.05a	27.50±1.34b	36.74±2.65a	28.17±2.83a	64.13±10.84ab	92.30±13.67ab	8.57±0.21a	23.4±2.1a	2.27±0.15b
鸡粪 Chicken manure	1.40±0.07a	25.91±3.70b	39.75±4.69a	31.30±4.37a	70.85±14.23a	102.15±13.74a	8.45±1.23a	21.4±3.4a	2.52±0.24ab
羊粪 Sheep manure	0.73±0.07c	10.27±1.41c	29.74±2.96b	22.31±1.27b	48.00±9.25b	70.31±10.45c	7.43±1.76a	24.8±3.7a	2.14±0.31b
猪粪 Pig manure	1.56±0.15a	33.76±4.48a	38.13±2.84a	28.70±2.96a	78.97±8.72a	107.68±10.89a	9.43±0.29a	24.8±2.3a	2.76±0.23a

NTA: Nitrogen transportation amount; NTR: Nitrogen transportation ratio; NHI: Nitrogen harvest index.

表 8 不同施肥处理对西瓜磷素积累的影响
Table 8 Effects of different fertilizer treatments on phosphorus accumulation of watermelon

处理 Treatment	苗期 Seedling stage (kg · hm ⁻²)	伸蔓期 Vine stage (kg · hm ⁻²)	坐果期 Fruit stage (kg · hm ⁻²)	成熟期 Mature stage (kg · hm ⁻²)		
				植株 Plant	果实 Fruit	全株 Total
化肥 Chemical fertilizer	0.07±0.01b	1.34±0.25c	1.37±0.25c	1.84±0.10c	10.77±1.22b	12.60±1.26b
牛粪 Cattle manure	0.15±0.01a	2.64±0.24b	3.21±0.19a	2.68±0.04b	16.13±1.06a	18.81±1.10a
鸡粪 Chicken manure	0.13±0.01a	2.34±0.20b	3.26±0.24a	3.35±0.39a	15.33±0.72a	18.68±0.99a
羊粪 Sheep manure	0.06±0.01b	0.93±0.21d	2.14±0.22b	2.18±0.05c	8.72±1.13c	10.90±1.09b
猪粪 Pig manure	0.15±0.01a	3.19±0.16a	3.30±0.09a	3.11±0.16a	16.54±0.87a	19.64±0.79a

表 9 不同施肥处理对西瓜钾素积累和转运的影响
Table 9 Effects of different fertilizer treatments on potassium accumulation and translocation of watermelon

处理 Treatment	苗期 Seedling stage (kg · hm ⁻²)	伸蔓期 Vine stage (kg · hm ⁻²)	坐果期 Fruit stage (kg · hm ⁻²)	成熟期 Mature stage (kg · hm ⁻²)			钾运转量 PTA (kg · hm ⁻²)	钾运转率 PTR (%)	钾收获 指数 PHI
				植株 Plant	果实 Fruit	全株 Total			
化肥 Chemical fertilizer	0.36±0.04b	4.90±0.93b	4.91±0.62c	5.48±0.59c	27.96±2.46c	33.44±2.91b	-0.57±0.54c	-	5.12±0.41ab
牛粪 Cattle manure	0.74±0.10a	9.77±1.22a	12.43±0.82a	10.30±1.64a	35.11±2.60b	45.42±2.74a	2.13±0.82b	17.5±7.9c	3.47±0.66b
鸡粪 Chicken manure	0.62±0.06a	9.38±0.88a	14.01±2.28a	9.71±1.39ab	37.63±3.97ab	47.34±5.10a	4.30±1.36a	30.4±6.1b	3.90±0.36b
羊粪 Sheep manure	0.31±0.08b	3.61±0.58b	9.29±0.99b	5.02±0.70c	22.73±3.48c	27.75±2.79b	4.27±0.32a	46.1±2.0a	4.65±1.35ab
猪粪 Pig manure	0.69±0.08a	11.52±1.44a	12.97±2.17a	7.74±1.24b	43.07±4.74a	50.81±4.21a	5.23±1.02a	40.3±2.8ab	5.69±1.25a

PTA: Potassium transportation amount; PTR: Potassium transportation ratio; PHI: Potassium harvest index.

的磷素积累量来看,除羊粪外,其他有机肥处理的磷素积累量均显著高于化肥处理,牛粪、鸡粪和猪粪处理的植株磷素积累量较化肥处理在苗期分别提高了114.3%、85.7%和114.3%,伸蔓期分别提高了97.0%、74.6%和138.1%,坐果期分别提高了134.3%、138.0%和140.9%,成熟期分别提高了45.7%、82.1%和69.0%,果实磷素积累量分别提高了49.8%、42.3%和53.6%,收获期磷素总积累量分别提高了49.3%、48.3%和55.9%。

2.3.3 钾素吸收积累 不同有机肥处理的西瓜苗期植株钾素含量与化肥处理差异不显著,伸蔓期和坐果期鸡粪和猪粪处理的植株钾素含量显著高于化肥处理,其中伸蔓期分别提高了21.3%和14.1%,坐果期分别提高了27.4%和25.9%,至成熟期除牛粪处理外,其他处理间差异未达到显著水平(表6)。

从表9可以看出,除羊粪处理外,西瓜各生育时期不同有机肥处理的钾素积累量均显著高于化肥处理,其中牛粪、鸡粪和猪粪处理在营养生长最大期的坐果期较化肥处理分别提高了153.2%、185.3%和164.2%,果实钾素积累量分别提高了25.6%、34.6%和54.0%,收获期钾素总积累量分别提高了35.8%、41.6%和51.9%。除化肥处理外,不同有机肥处理在果实发育期营养器官的钾素均发生了不同程度的转移,且以鸡粪、羊粪和猪粪处理的钾素运转量和运转

率较高。不同有机肥与化肥处理间的西瓜钾素收获指数差异未达到显著水平。

3 讨 论

西瓜属于根敏感型作物,对养分的需求较为严格,因此合理施肥对西瓜生产具有重要意义。本研究结果表明,在等量养分条件下,除羊粪外,其他有机肥处理较化肥处理均不同程度促进了西瓜的营养生长、提高了产量、改善了品质,这与以往研究结果相似^[26-28]。而在砂田西瓜栽培模式下施用有机肥具有更重要的意义。首先,砂田区土壤多为沙土,保水性能差,而合理配施有机肥可降低土壤容重,增加土壤总孔隙度,增强土壤保水蓄水能力,并能提高作物对深层土壤水分的利用^[29]。李银坤等^[30]研究表明,与单施化肥对照相比,有机肥与化肥配施处理0~160 cm土层土壤贮水量提高8.8%~10.5%,夏玉米水分利用效率显著提高7.4%。其次,砂田由于砂砾层覆盖,有机肥尤其是畜禽粪肥施入困难,因此,近年来砂田主要以化肥耨施为主而有机肥施用次数减少,造成砂田土壤微量元素缺乏,养分比例失调。而有机肥不仅含有作物生长所需的N、P、K等大量元素,又含有S、Mg、Cu、Zn、Fe、Mn、Mo、B等微量元素,有机肥输入农田的微量元素远高于化肥^[5]。以往研究表明,施硼有利于砂田西瓜维生素C含量的提

高和氮素的吸收,施锌则有利于西瓜果实含糖量的提高和钾素的吸收^[31].另外,随着近年来砂田西瓜的集约化生产,连作障碍已成为压砂瓜产业健康发展的最大障碍^[12],而有机肥能有效改善连作西瓜土壤微生物区系,从而抑制西瓜连作障碍^[16,18].

不同有机肥肥效因区域土壤类型、作物、栽培模式而异.赵鹏等^[19]在江苏南京西瓜上的研究表明,在等量养分条件下施用羊粪有机肥的西瓜产量和 Vc 含量较猪粪处理分别提高了 9.4% 和 59.4%;而要晓玮等^[32]在陕西杨凌辣椒上的研究表明,在等量氮磷钾养分条件下,结果盛期猪粪和牛粪处理的辣椒单果质量较羊粪处理分别显著提高了 28.3% 和 22.5%,果实 Vc 含量分别提高了 16.2% 和 70.1%.本研究结果也表明,在西北旱区砂田西瓜栽培模式下,牛粪、鸡粪、猪粪处理的西瓜产量、可溶性固形物和 Vc 含量均显著高于羊粪处理,且以鸡粪和猪粪处理较优.这主要与区域土壤肥力特征和有机肥养分含量有关,首先,砂田区土壤肥力特征为少氮缺磷富钾,磷是影响砂田西瓜产量和品质的主要因素^[21],在本试验所涉及的几种有机肥中,猪粪和鸡粪的全磷含量最高,羊粪最低.其次,增施锌肥可提高西瓜果实中甜味和鲜味氨基酸含量,而降低苦味氨基酸含量,对改善西瓜品质效果显著^[33],而我国北方石灰性土壤有效锌含量严重不足,锌已成为作物生长发育的“限制因子”之一^[34].李书田等^[35]对我国 20 个省(市)主要畜禽粪便的养分含量测试分析表明,鸡粪、猪粪、牛粪的平均 Zn 含量分别是羊粪的 3.5、7.5 和 1.6 倍.另外,砂田石灰性土壤 pH 值较高,鸡粪、猪粪、牛粪的平均 pH 值均低于羊粪,羊粪的平均 pH 值达到了 8.1^[35].王彦伟^[36]研究表明,在新疆石灰性土壤上施用酸性肥料有助于降低土壤酸碱度,缓解土壤碱性对作物生长发育的不良影响,提高作物产量.

有机肥矿化受温度、水分、微生物种类、自身理化性质等综合因素的影响^[37].有机肥氮素的矿化释放是微生物主导的生物化学过程,与有机肥自身的碳、氮含量有密切关系,有机肥的 C/N 相对较小,易激发土壤微生物活性和易发生矿化作用^[38].周博等^[39]研究表明,有机肥碳、氮的矿化量与有机肥全氮含量均呈线性关系,有机肥氮含量是影响矿化量的主导因子.在本试验所供试的有机肥中,牛粪、猪粪和鸡粪的全氮含量是羊粪的 2.2~3.6 倍,且 C/N 均低于羊粪,因此其对应的氮素平均矿化量和矿化率也高于羊粪,这也是西瓜营养生长期羊粪处理的

植株氮素含量与氮素积累量显著低于其他有机肥处理的主要原因.化肥主要增加土壤无机磷组分,有机肥主要增加有机磷含量,而有机磷的移动性更强,相对化肥而言,相同磷素投入水平下,有机肥对于土壤磷素累积尤其是活性态磷的累积贡献更大^[40],其原因是有机肥分解产生的大量有机酸对土壤本身的磷有活化作用,降低土壤对磷的吸附强度^[41].本试验中,猪粪、鸡粪、牛粪处理的西瓜主要生育时期磷素含量与积累量显著高于羊粪和化肥处理,且以猪粪处理最高.首先与有机肥的全磷含量有关,供试有机肥全磷含量为猪粪>鸡粪>牛粪>羊粪,这与李书田等^[35]对我国 20 个省(市)主要畜禽粪便养分含量的测定分析结果相似;其次与有机肥磷素的有效性和矿化速率有关,猪粪带入磷的生物有效性和移动性明显高于鸡粪和化学磷肥^[42],猪粪有机肥的施用提高了土壤酸性磷酸酶和植酸酶活性,根际较高的酸性磷酸酶和植酸酶活性有利于提高土壤磷素生物有效性,促进植物对磷的吸收积累^[43].虽然羊粪全钾含量最高,但试验结果仍表现出与氮、磷吸收积累相似的趋势,即猪粪、鸡粪和牛粪处理的西瓜钾素含量与积累量显著高于羊粪和化肥处理.这主要与土壤养分状况和作物养分吸收的交互作用有关,对于西北砂田富钾土壤而言,钾不是作物生长的最大限制因素,其对西瓜生长的影响要低于氮和磷^[21],这也符合最小养分率.在此条件下,养分元素之间的协同作用更为重要,以往研究表明,砂田西瓜的氮钾、磷钾交互作用显著,对钾素而言,磷的交互效应大于氮^[21],且西瓜对磷、钾养分之间的吸收利用呈极显著正相关^[44].

4 结 论

西北干旱半干旱砂田西瓜种植区,在氮、磷、钾等养分条件下,牛粪、鸡粪和猪粪有机肥与化肥配施较单施化肥增加了西瓜植株营养生长期对氮、磷、钾养分的吸收和积累,促进了源库协调发展,实现了西瓜产量和品质的提升,达到了增产、提质、增效的目的.其中对西瓜增产作用表现为:鸡粪>猪粪>牛粪>羊粪;对西瓜提质和养分增效作用表现为:猪粪>鸡粪>牛粪>羊粪.因此,应根据区域土壤肥力特性和作物需肥特征合理选择有机肥源.

参考文献

- [1] Liu X-Y (刘晓永). Study on Nutrient Balance and Requirement in Agricultural Production in China. PhD

- Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018 (in Chinese)
- [2] Peng J (彭靖). Review and discussion on utilization of agricultural waste resources in China. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2009, **18** (2): 794–798 (in Chinese)
 - [3] Jiang C-L (姜灿烂), He Y-Q (何园球), Liu X-L (刘晓利), *et al.* Effect of long-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2010, **47** (4): 715–722 (in Chinese)
 - [4] Whalen JK, Hu QC, Liu AG. Compost applications increase water-stable aggregates in conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, **67**: 1842–1847
 - [5] Ning C-C (宁川川), Wang J-W (王建武), Cai K-Z (蔡昆争). The effects of organic fertilizers on soil fertility and soil environmental quality: A review. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2016, **25**(1): 175–181 (in Chinese)
 - [6] Huang S, Rui WY, Peng XX, *et al.* Organic carbon fractions affected by long-term fertilization in a subtropical paddy soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, **86**: 153–160
 - [7] Timo K, Cristina LF, Frank E. Abundance and biodiversity of soil microarthropods as influenced by different types of organic manure in a long term field experiment in Central Spain. *Applied Soil Ecology*, 2006, **33**: 278–285
 - [8] Ren F-L (任凤玲), Zhang X-B (张旭博), Sun N (孙楠), *et al.* A meta-analysis of manure application impact on soil microbial biomass across China's croplands. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2018, **51** (1): 119–128 (in Chinese)
 - [9] Xie J (谢军), Zhao Y-N (赵亚南), Chen X-J (陈轩敬), *et al.* Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2016, **49** (20): 3934–3943 (in Chinese)
 - [10] Li S-Y (李恕艳), Li J-J (李吉进), Zhang B-X (张邦喜), *et al.* Effect of different organic fertilizers application on tomato quality and flavor. *Soil and Fertilizer Sciences in China* (中国土壤与肥料), 2017 (2): 114–119 (in Chinese)
 - [11] Ge G (戈敢). The development and importance of pebble mulch in China. *Journal of Agricultural Sciences* (农业科学研究), 2009, **30**(4): 52–54 (in Chinese)
 - [12] Ma Z-M (马忠明), Du S-P (杜少平), Xue L (薛亮). Theory and Technology of High-Efficient Use of Water and Fertilizer for Watermelon and Melon in Gravel-Mulched Field. Beijing: Science Press, 2018 (in Chinese)
 - [13] Xu Q (许强), Wu H-L (吴宏亮), Kang J-H (康建宏), *et al.* Study on evolution characteristics of sandy-field in arid region. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2009, **27**(1): 37–41 (in Chinese)
 - [14] Du S-P (杜少平), Ma Z-M (马忠明), Xue L (薛亮). Distribution characteristics of soil aggregates and associated organic carbon in gravel-mulched land with different cultivation years. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2017, **28**(5): 1619–1625 (in Chinese)
 - [15] Xie J-N (谢娟娜), Fang Q (房琴), Lu Y (路杨), *et al.* Increasing organic fertilizers on improving salt resistance of crop. *Chinese Agricultural Science Bulletin* (中国农学通报), 2018, **34**(3): 42–50 (in Chinese)
 - [16] Zhu P-P (朱盼盼), Zhang X (张显), Ren Z-L (任自力). Effects of different fertilizer application on soil microflora of continuous cropping watermelon. *Northern Horticulture* (北方园艺), 2013 (11): 171–174 (in Chinese)
 - [17] Li S-X (李双喜), Shen Q-R (沈其荣), Zheng X-Q (郑宪清), *et al.* Effect of organic microbe fertilizer application on watermelon growth and soil microorganisms under continuous mono-cropping. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2012, **20**(2): 169–174 (in Chinese)
 - [18] Lyu W-G (吕卫光), Huang Q-W (黄启为), Shen Q-R (沈其荣), *et al.* The effect of organic fertilizer and organic-inorganic fertilizer application on soil enzymes activities during watermelon growing period. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2005, **28**(4): 68–71 (in Chinese)
 - [19] Zhao P (赵鹏), Dong C-X (董彩霞), Shen C-W (申长卫), *et al.* Effects of three organic and inorganic fertilizers combined application on absorption of nitrogen and potassium, yield and quality of watermelon. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2015, **38**(2): 288–294 (in Chinese)
 - [20] Cao Y-E (曹云娥), Li J-S (李建设), Gao Y-M (高艳明), *et al.* Effects of different organic materials on greenhouse soil environment and watermelon growth. *China Vegetables* (中国蔬菜), 2016(9): 47–51 (in Chinese)
 - [21] Du S-P (杜少平), Ma Z-M (马忠明), Xue L (薛亮). Effects of combined application of N, P and K on yield and quality of watermelon in gravel-mulched fields. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2016, **22**(2): 468–475 (in Chinese)
 - [22] Hao J-J (郝建军). Experimental Technique in Plant Physiology. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2001 (in Chinese)
 - [23] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
 - [24] Ma Z-M (马忠明), Du S-P (杜少平), Xue L (薛亮). Effects of nitrogen managements on yield, quality, nitrogen accumulation and its transportation of watermelon in gravel-mulched field. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2015, **26** (11): 3353–3360 (in Chinese)
 - [25] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局). Safety Qualification for Agricultural Product Safety

- Requirements for Non-environmental Pollution Fruit (GB 18406.2-2001). Beijing: China Standards Press, 2001 (in Chinese)
- [26] Li Q-W (李庆伟), Zhang Y-F (张亚菲), Wang Y-J (王应君), *et al.* Effect of commercial organic fertilizer on the quality and yield of watermelon. *Heilongjiang Agricultural Sciences* (黑龙江农业科学), 2015(2): 33-36 (in Chinese)
- [27] Pu Y-Y (蒲瑶瑶), Lyu X-M (吕秀敏), Wu M-C (邬梦成), *et al.* Effects of partial substitution for chemical fertilizer by organic manure on the growth and nutrient use of watermelon under fumigation condition. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2017, **31**(6): 306-311 (in Chinese)
- [28] Cao Y-E (曹云娥), Li J-S (李建设), Gao Y-M (高艳明), *et al.* Effects of different organic materials on greenhouse soil environment and watermelon growth. *China Vegetables* (中国蔬菜), 2016(9): 47-51 (in Chinese)
- [29] Sharma KL, Mandal UK, Srinivas K, *et al.* Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil and Tillage Research*, 2005, **83**: 246-259
- [30] Li Y-K (李银坤), Mei X-R (梅旭荣), Xia X (夏旭), *et al.* Effect of nitrogen reduction and combined application of organic fertilizer on soil water dynamics and water and nitrogen use efficiency of summer maize in North China Plain. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2018, **25**(5): 54-60 (in Chinese)
- [31] Du S-P (杜少平), Ma Z-M (马忠明), Xue L (薛亮). Effect of potassium, boron and zinc fertilizers on growth and nutrient uptake in watermelon grown in gravel-mulched fields. *Journal of Fruit Science* (果树学报), 2016, **33**(7): 841-849 (in Chinese)
- [32] Yao X-W (要晓玮), Liang Y-L (梁银丽), Zeng R (曾睿), *et al.* Effects of different organic fertilizers on the yield and quality of pepper. *Journal of Northwest A&F University* (西北农林科技大学学报), 2011, **39**(10): 157-162 (in Chinese)
- [33] Niu Q-L (牛庆良), Huang D-F (黄丹枫), Zhao Z-K (赵志昆). Effects of zinc enrichment on substance accumulation and quality of melon fruit. *Journal of Shanghai Jiaotong University* (上海交通大学学报), 2006, **24**(3): 235-239 (in Chinese)
- [34] Han J-L (韩金玲), Li Y-M (李雁鸣), Ma C-Y (马春英). The effect of zinc on crop growth and yield. *Journal of Hebei Normal University of Science and Technology* (河北科技师范学院学报), 2004, **18**(4): 72-76 (in Chinese)
- [35] Li S-T (李书田), Liu R-L (刘荣乐), Shan H (陕红). Nutrient contents in main animal manures in China. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2009, **28**(1): 179-184 (in Chinese)
- [36] Wang Y-W (王彦伟). Acidic Fertilizer Performance on Wheat in Calcareous Soil. PhD Thesis. Shihezi: Shihezi University, 2017 (in Chinese)
- [37] Agehara S, Warncke D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, **69**: 69-73
- [38] Han X-R (韩晓日), Zheng G-D (郑国砥), Liu X-Y (刘晓燕), *et al.* Dynamics, sources and supply characteristic of microbial biomass nitrogen in soil applied with manure and fertilizer. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(4): 765-772 (in Chinese)
- [39] Zhou B (周博), Gao J-J (高佳佳), Zhou J-B (周建斌). Carbon and nitrogen mineralization characteristics of different types of organic manures. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2012, **18**(2): 366-373 (in Chinese)
- [40] Reddy DD, Rao AS, Rupa TR. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic phosphorus in a Vertisol. *Biore-source Technology*, 2000, **75**: 113-118
- [41] Zhao X-Q (赵晓齐), Lu R-K (鲁如坤). Effect of organic manures on soil phosphorus adsorption. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1991, **28**(1): 7-13 (in Chinese)
- [42] Zhang T (张田), Xu H (许浩), Ru S-H (茹淑华), *et al.* Distribution of phosphorus in soil profiles after continuous application of different fertilizers. *Environmental Science* (环境科学), 2017, **38**(12): 5247-5255 (in Chinese)
- [43] Chen J (陈静), Huang Y-S (黄有胜), Li T-X (李廷轩). Phosphorous accumulation characteristics of two ecotypes of *Pilea sinofasciata* grown in soils amended with swine manure. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2017, **26**(11): 139-146 (in Chinese)
- [44] Ma Z-M (马忠明), Du S-P (杜少平), Xue L (薛亮). Effects of combined application of P and K on the yield, quality and nutrient utilization of watermelon in gravel-mulched field. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2014, **20**(3): 687-695 (in Chinese)

作者简介 杜少平,男,1979年生,硕士,副研究员。主要从事西甜瓜高效栽培技术研究。E-mail: dushaoping2007@163.com

责任编辑 张凤丽